

Алгоритм синхронизации результатов измерений положения электромеханической системы и электродвижущей силы индукции при реализации динамического режима весов Киббла

Андрей Федорович Марков¹, Вадим Андреевич Хвостов²✉

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

¹a.f.markov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0028-0324>

²v.a.khvostov@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9163-7186>

Аннотация. Разработан алгоритм синхронизации результатов измерений электродвижущей силы индукции и положения катушки электромеханической системы при реализации динамического режима весов Киббла. Данный алгоритм позволяет привести ряды данных к общей временной шкале без применения аппаратных средств синхронизации устройств сбора данных. Алгоритм основан на применении метода численного дифференцирования результатов измерений с помощью фильтрации Савицкого-Голея, выборе и минимизации методом градиентного спуска специальной целевой функции в виде стандартного отклонения между преобразованными в результате дифференцирования и последующей интерполяции временными значениями электродвижущей силы катушки и соответствующими значениями скорости перемещения катушки. Предложенный алгоритм обработки результатов измерений положения и электродвижущей силы индукции катушки экспериментально опробован в рамках научно-исследовательской работы «Баланс». Результаты измерений получены с помощью входящих в состав макета весов Киббла средств измерений с асинхронными интерфейсами. Применение алгоритма позволило более чем в 10 раз уменьшить погрешность обработки экспериментальных данных, связанную с отсутствием синхронизации результатов измерений положения и электродвижущей силы индукции катушки, полученных в динамическом режиме работы созданного макета весов Киббла.

Ключевые слова: весы Киббла, синхронизация измерений, численное дифференцирование, метод градиентного спуска, асинхронный интерфейс

Для цитирования: А. Ф. Марков, В. А. Хвостов. Алгоритм синхронизации результатов измерений положения электромеханической системы и электродвижущей силы индукции при реализации динамического режима весов Киббла // Измерительная техника. 2022. № 1. С. 41–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-1-41-45>

Финансирование: работа выполнена в рамках НИР «Исследование путей создания эталона килограмма на основе ватт-весов», шифр «Баланс» (государственный контракт № 120-85/2020 от 15.09.2020 г.).

Algorithm for synchronizing the results of measurements of position and EMF of induction in the implementation of the calibration mode of the Kibble balance

Andrei F. Markov¹, Vadim A. Khvostov²✉

^{1, 2} D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia

¹a.f.markov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0028-0324>

²v.a.khvostov@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-0028-0324>

Abstract. An algorithm for synchronizing the results of measuring the position of the coil of an electromechanical system (EMS) with measurements of the electromotive force (EMF) of the induction of the EMS coil when implementing the dynamic mode of the Kibble balance has been developed. This algorithm allows the data sets to be scaled to a common time scale without the use of hardware synchronization of data acquisition devices. The algorithm is based on using the method of numerical differentiation of measurement results using Savitsky-Golay filtering, the selection and minimization of a special objective function by the gradient descent method in the form of a standard deviation between the time values of the EMF of the EMS coil converted as a result of differentiation and subsequent interpolation and the corresponding values of the movement speed the EMS coil. During “Balance” research work, experimental studies were carried out to test the algorithm for processing the results of measurements of the position of the EMS coil and the EMF of the induction of the EMS coil, obtained using the measuring instruments with asynchronous interfaces included in the Kibble balance model. Using the algorithm provides tenfold reducing of the error of the experimental data processing results, due to the lack of synchronization of the results of measurements of the position of the EMS coil and the EMF of the induction of the coil, obtained in the dynamic mode of operation of the created model of the Kibble balance.

Keywords: Kibble balance, measurement synchronization, numerical differentiation, gradient descent method, asynchronous interface

Financial Support: the work was carried out within the research project “Research of ways to create a standard kilogram based on watt-balance”, cipher “Balance” (state contract № 120-85/2020 from 15.09.2020).

Введение. На 26-й Генеральной конференции по мерам и весам одобрено решение об окончательном переходе к обновлённой Международной системе единиц (SI) [1]. Были переопределены четыре основные единицы, в том числе килограмм. Наиболее перспективным методом воспроизведения килограмма является использование весов Киббла – инструмента для установления соотношения между массой и электрической мощностью.

Электромеханическая система весов Киббла состоит из коромысла, на одном плече которого находится катушка, помещённая в магнитное поле [2]. Опишем основы измерений с помощью весов Киббла. Весы имеют два режима работы: статический (режим взвешивания) и динамический. В статическом режиме вес mg тела массой m уравнивается вертикальной силой BLI , возникающей при протекании силы тока I в помещённой в магнитное поле индукцией B катушке из провода длиной L :

$$mg = BLI.$$

В динамическом режиме катушка перемещается в магнитном поле со скоростью V , в результате чего в катушке индуцируется электродвижущая сила (ЭДС):

$$U = BLV.$$

Приняв BL неизменным между статическими и динамическими измерениями, получим

$$UI = mgV. \quad (1)$$

Поскольку силы тяжести и тока измеряются отдельно от скорости и напряжения, то выражение (1) связывает виртуальные электрическую и механическую мощности. Сравнение виртуальной мощности устраняет влияние резистивных

потерь, потерь на трение и вихревые токи, которые серьёзно затрудняют прямое сравнение мощностей. Это позволяет достигнуть общей неопределённости порядка 10^{-8} кг, требуемой для переопределения килограмма.

Для реализации вышеописанного метода необходима синхронизация механической и электрической измерительных систем. Синхронизация такого рода не всегда может быть обеспечена аппаратными методами.

Цель данной работы – разработка и опробование вычислительных методов, позволяющих синхронизировать результаты измерений положения катушки электромеханической системы с измерениями ЭДС индукции и привести их к единой шкале времени.

Эксперимент. В рамках НИР «Исследование путей создания эталона килограмма на основе ватт-весов», шифр «Баланс», проводимой на базе ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, создан макет весов Киббла для воспроизведения малых значений массы с пределом взвешивания до 10 г. Конструктивно макет представляет собой равноплечие весы с аэростатическими направляющими. На плечах подвешены измерительная электромагнитная система и электромагнитный актуатор. В динамическом режиме измерения производятся без установки полезной нагрузки. Перемещение катушки электромеханической системы реализовано с помощью линейного электромагнитного актуатора, управляемого промышленным контроллером Elmo Gold DC Whistle (Elmo Motion Control Ltd, Израиль). Обратная связь по скорости обеспечена энкодером Renishaw Vionic (Renishaw plc, Великобритания) с линейной шкалой разрешением 2,5 нм. ЭДС катушки регистрируется мультиметром Keysight 3458A (Keysight Technologies, США).

Динамический режим реализован в соответствии со следующим алгоритмом: позиционирование в точке на границе области движения; разгон до заданной скорости; движение с заданной скоростью; формирование сигнала запуска на мультиметр при пересечении границы области регистрации и старт записи положения; остановка в точке противоположной границы области движения; ожидание старта следующего измерения (с проходом в противоположную сторону) или остановки.

Контроллер и мультиметр перед каждой записью конфигурируются на необходимые частоту дискретизации и количество измерений. Области регистрации и движения расположены симметрично относительно точки, в которой происходит взвешивание в соответствующем режиме. Характерный пример зависимости положения движущейся части макета от времени в динамическом режиме представлен на рис. 1. Нестабильность скорости перемещения предъявляет высокие требования к синхронизации измерений ЭДС и положения движущейся части макета.

Использованный в макете мультиметр Keysight 3458A, обладая необходимыми метрологическими характеристиками, имеет ряд недостатков [3]:

недостаточный объём буфера для измеренных данных и невозможность передавать данные по мере их поступления;

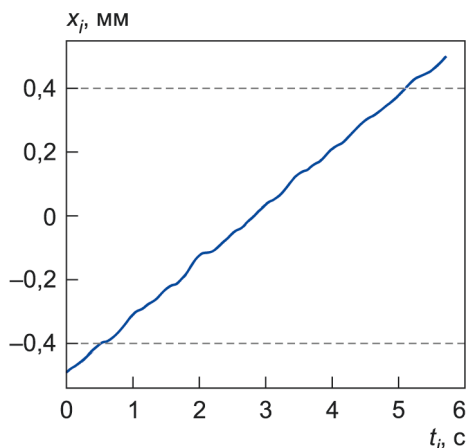


Рис. 1. Зависимость положения x_i движущейся части макета от времени t_i в динамическом режиме; пунктирными линиями выделена область регистрации положения

Fig. 1. Time dependence of the position of the moving part of the layout in the dynamic mode. Dashed lines indicate the area of position registration

сложная зависимость итоговой частоты сэмпирования от настроек (помимо настройки времени аперттуры на частоту сэмпирования влияет выбранный режим преобразования чисел, включение автокалибровки и дисплея).

Указанные недостатки не влияют на измерения в статическом режиме (второй фазе измерений). Однако в динамическом режиме (первой фазе измерений) они становятся критическими и приводят к невозможности настройки вольтметра для синхронных измерений с датчиком положения. В итоге вольтметр измеряет с приблизительно известной заранее частотой. Также, несмотря на использование входа синхронизации для запуска измерений, имеется некоторая задержка между моментами времени, соответствующими старту измерения положения и старту измерения напряжения. Данные обстоятельства приводят к необходимости алгоритмически синхронизировать результаты измерений обоих приборов.

Описание алгоритма. Обозначим положение движущейся части макета как x_i , где i – номер зарегистрированного положения. При этом положение отсчитывается относительно середины диапазона перемещения и выражается в миллиметрах. Измеренное вольтметром напряжение на катушке обозначим как U_k , где k – порядковый номер измеренного напряжения. Регистрация положения происходит с постоянной частотой F_x . Данная частота известна и её нестабильность вносит в бюджет погрешностей несущественный вклад при текущей достигнутой точности макета. Поэтому моменты времени регистрации положения можно считать известными:

$$x_i = x(t_i); t_i = i\Delta t; \Delta t = F_x^{-1},$$

где $x(t_i)$ – положение в момент времени t_i ; t_i – моменты времени, соответствующие событиям регистрации положения.

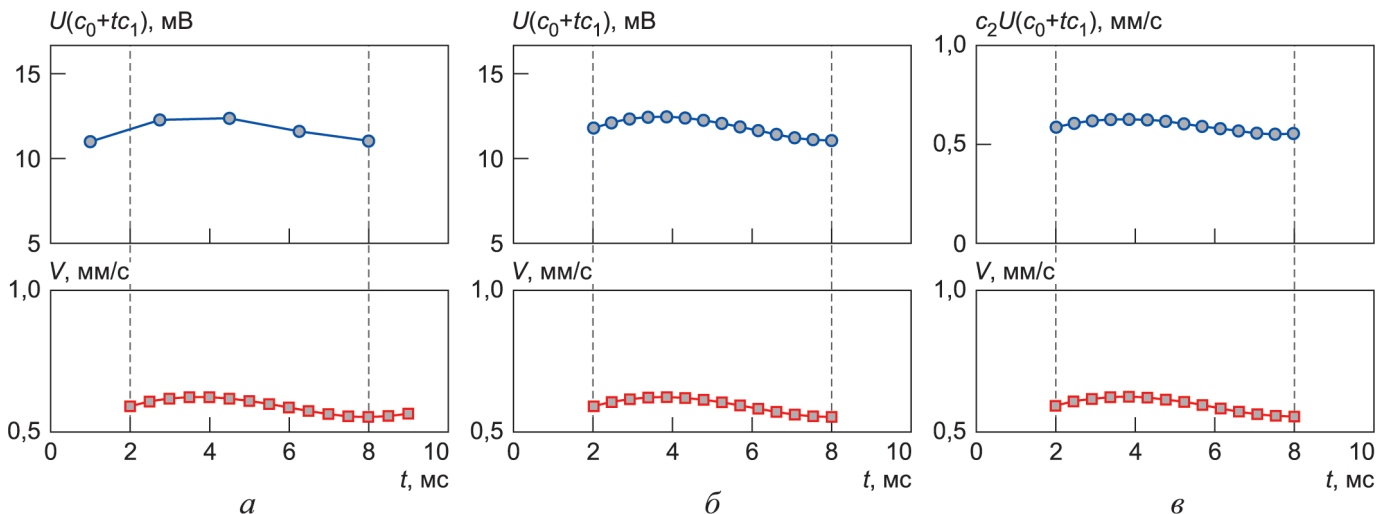


Рис. 3. Зависимость анализируемых рядов данных от времени при расчёте текущего значения целевой функции алгоритма: а – применение параметров временных сдвига и масштаба; б – ограничение рядов по пересекающемуся диапазону времени и интерполяция верхнего ряда к моментам времени нижнего ряда; в – применение параметра-коэффициента; пунктирной линией отмечен пересекающийся диапазон времени

Fig. 3. Time dependency of analyzed data set during target function value calculating: а – using of time shift and scale parameters; б – restriction of the series by the intersecting time range and the interpolation of the upper series to the time moments of the lower series; в – using of the parameter-coefficient; dashed line marks the intersecting time range

Регистрация ЭДС происходит одновременно с регистрацией положения, но частота регистрации ЭДС F_U известна лишь приблизительно. В связи с этим данные вольтметра необходимо сопоставить с моментами времени регистрации положения.

Перед началом сравнительного анализа двух рядов данных необходимо определить скорость в соответствующие моменты времени, для чего требуется численно продифференцировать ряд данных x_i . Из известных методов численного дифференцирования зашумлённых данных был выбран метод дифференцирования с помощью фильтрации Савицкого-Голея [4]. В определённом диапазоне отсчётов вокруг каждой точки ряда x производится аппроксимация точек

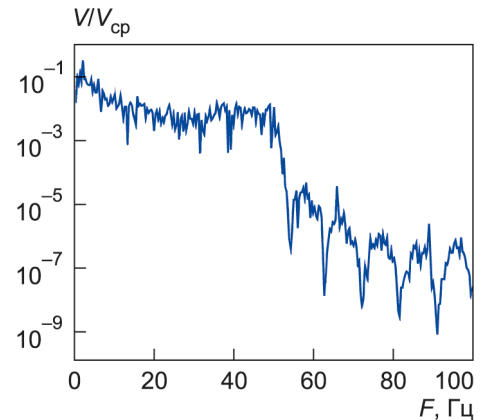


Рис. 2. Амплитудный спектр отношения скорости V к среднему значению скорости V_{cp} ; F – частота гармоники

Fig. 2. Ratio of the speed V to the average value of the speed V_{mean} amplitude spectrum; F – harmonic frequency

из текущего диапазона кубическим полиномом методом наименьших квадратов:

$$p_i(t) = p_i^{(0)} + p_i^{(1)}t + p_i^{(2)}t^2 + p_i^{(3)}t^3, \quad t \in [t_{i-N}, t_{i+N}],$$

$$S = \sum_{m=-N}^N (x_{i+m} - p_i(t_m))^2,$$

где p – искомый полином; t – время; S – целевая функция минимизации; N – полуширина окна фильтрации.

Коэффициенты полиномов рассчитываются стандартным для линейного метода наименьших квадратов способом – с помощью нахождения псевдообратной матрицы. Затем дифференцирование ряда данных сводится к дифференцированию соответствующих полиномов. Поскольку значение полинома, соответствующее текущей точке, определяется моментом $t=0$, то значение производной в каждой точке – это коэффициент при линейном члене полинома

$$V_i = p_i^{(1)},$$

где V_i – скорость в точке i .

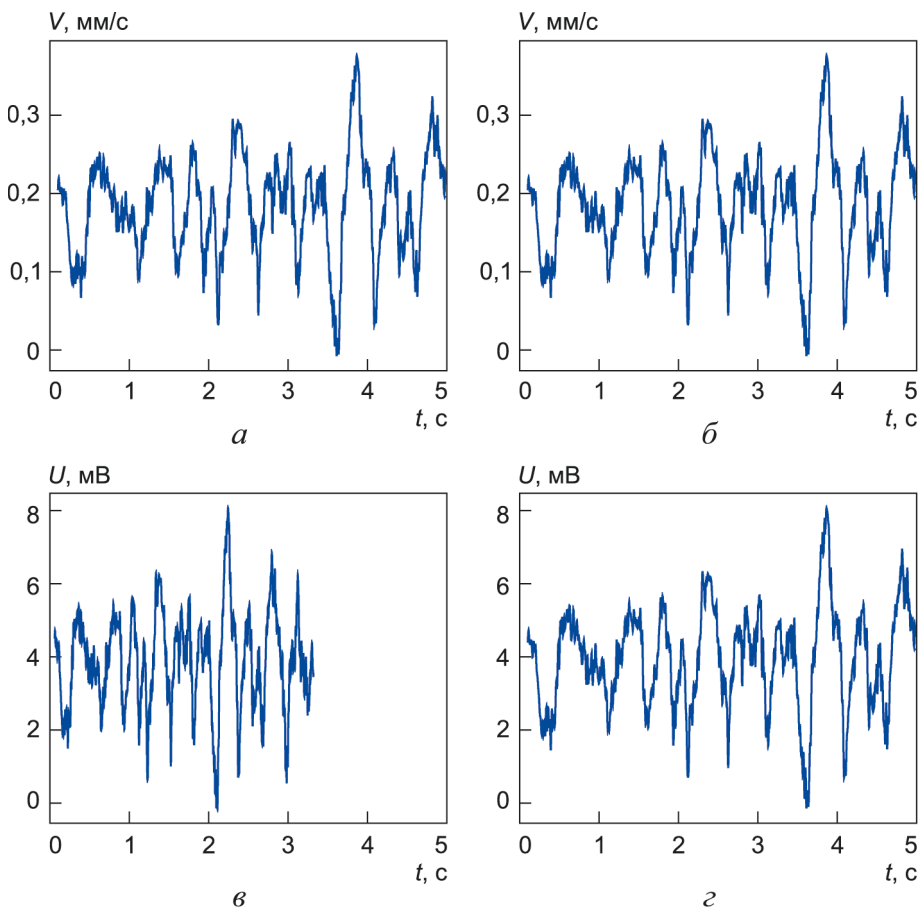


Рис 4. Зависимости скорости V (а, б) и ЭДС U (в, г) от времени t : исходные (а, в) и после обработки (б, г) алгоритмом; время на графике в следует считать условным

Fig. 4. Time dependences of velocity (а, б) and EMF (в, г): initial (а, в) and after algorithm processing (б, г); the time on the lower left graph (EMF before processing) should be considered conditional

Полуширина окна фильтрации N выбирается исходя из отсутствия статистической значимости изменения результата от удвоения N . Следует отметить, что данный способ уменьшает диапазон точек относительно исходного ряда данных: по N точек в начале и конце ряда данных недоступны для указанного метода. В данном случае диапазон перемещений движущейся части макета, в котором происходит регистрация положения, всегда можно расширить до необходимого значения, оставив по краям несущественную для анализа часть.

После дифференцирования имеем два ряда данных: V_i, U_i . Исходя из математической модели ватт-весов текущее значение ЭДС индукции катушки пропорционально текущей скорости:

$$U(t) = BLV(t). \quad (2)$$

Это обеспечивает высокую корреляцию рядов данных U_i, V_i при правильном приведении их к одному времени. Типичный пример спектральных характеристик скорости и ЭДС представлен на рис. 2. Во-первых, зависимости имеют подобный характер, во-вторых, отсутствуют ярко выраженные гармонические процессы. Отсутствие подобия зависимостей

означало бы неправильность математической модели (2) или сильный неучтённый шум. В таком случае не следует ожидать высокую корреляцию данных и, соответственно, корректную работу описываемого алгоритма. Ярко выраженный гармонический процесс обеспечил бы высокую корреляцию рядов данных при сведении времени с точностью до периода этого процесса. Это также не позволило бы применить описываемый алгоритм напрямую. Вид представленных данных позволяет ожидать корректную работу алгоритма.

Данная процедура заключается в минимизации некоторой целевой функции методом градиентного спуска [5]. Обозначим параметры минимизации как $\{c_0, c_1, c_2\}$. Расчёт текущего значения целевой функции происходит по следующему алгоритму:

1. Линейное преобразование времени измерения напряжения согласно текущим значениям параметров минимизации $t_i = c_0 + c_1 t_U$.
2. Определение пересекающегося диапазона времени t_i и времени регистрации

Значения BL и разброса ΔBL с использованием алгоритма и без него

Использование алгоритма	BL , Вс/м	ΔBL , Вс/м
Нет	20,90	0,80
Да	21,42	0,07

положения t_v . Удаление элементов, не принадлежащих указанному диапазону.

3. Интерполяция значений ряда данных U_j , соответствующих моментам времени t_j , в точки, соответствующие моментам времени t_v .

4. Расчёт разности $\delta_i = V_i - U_i c_2$.

5. Расчёт стандартного отклонения по ряду δ и вывод его в качестве значения целевой функции.

Пункты 2–3 данного алгоритма проиллюстрированы на рис. 3.

В качестве начального приближения для алгоритма используются следующие значения: $c_{0\text{нач}} = 0$; $c_{1\text{нач}} = 1$; $c_{2\text{нач}} = BL_{\text{пр}}^{-1}$, где $BL_{\text{пр}}$ – приблизительное значение параметра BL , рассчитанное исходя из измеренного значения индукции в зазоре магнитной системы и общей длины провода в катушке.

Процесс минимизации заканчивается по стандартному для метода градиентного спуска критерию – достижение нормой градиента целевой функции значения меньшего некоторого заданного значения.

Результат работы алгоритма продемонстрирован на рис. 4. Для примера представлена запись движения при заданном значении скорости 0,15 мм/с. Без применения указанного алгоритма оценка геометрического коэффициента магнитной системы $BL = U/V$ возможна только для средних по записи значений. В таком случае стандартное отклонение BL можно оценить с помощью набора таких записей. При использовании алгоритма коэффициент BL и его стандартное отклонение возможно оценивать поточно как в рамках одной записи, так и по всем записям сразу.

Результаты вычислений указанных оценок представлены в таблице.

Алгоритм реализован с использованием языка программирования высокого уровня Python версии 3.9 и библиотеки численных расчётов NumPy [6].

Заключение. Предложен алгоритм синхронизации результатов измерений в различных областях обработки экспериментальных данных. Алгоритм позволяет синхронизировать временные ряды разной физической природы и переходить от анализа зависимостей средних значений величин на большом временном интервале к сравнению зависимостей мгновенных значений, привязанных к единому моменту времени. В эксперименте по реализации динамического режима весов Киббла погрешность определения масштабного коэффициента электромагнитной системы была уменьшена примерно на порядок.

Разработанный алгоритм особенно актуален при использовании средств измерений, оснащённых современными асинхронными интерфейсами передачи данных, но не имеющих возможностей аппаратной синхронизации измерений. Применение таких средств измерений в комплексных системах может стать экономически выгодным, а алгоритмическая синхронизация данных обеспечит проведение измерений без потери точности.

Список источников

1. *Proceedings of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures*, Versailles, November 13–16, 2018.
2. Robinson Ian A., Schlamminger S., *Metrologia*, 2016, vol. 53, pp. A46–A74. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
3. Mester C., *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018, pp. 1–2. <http://dx.doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501165>
4. Ahnert K., Abel M., *Computer Physics Communications*, 2007, vol. 177, pp. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.03.009>
5. Nocedal J., Wright S. J., *Numerical Optimization*, Springer New York, 2006, 634 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>
6. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., et al., *Nature*, 2020, vol. 585, pp. 357–362. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

References

1. *Proceedings of the 26th meeting of the General Conference on Weights and Measures*, Versailles, November 13–16, 2018.
2. Robinson Ian A., Schlamminger S., *Metrologia*, 2016, vol. 53, pp. A46–A74. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
3. Mester C., *Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018, pp. 1–2. <http://dx.doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501165>
4. Ahnert K., Abel M., *Computer Physics Communications*, 2007, vol. 177, pp. 764–774. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2007.03.009>
5. Nocedal J., Wright S. J., *Numerical Optimization*, Springer New York, 2006, 634 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>
6. Harris C. R., Millman K. J., van der Walt S. J., et al., *Nature*, 2020, vol. 585, pp. 357–362. <http://dx.doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

Статья поступила в редакцию 09.11.2021; одобрена после рецензирования 19.11.2021; принята к публикации 20.12.2021.
The article was submitted 09.11.2021; approved after reviewing 19.11.2021; accepted for publication 20.12.2021.